

季节负荷波动下汽机真空系统运行方式调整及经济性分析

成朋飞

陕煤电力运城有限公司 山西 运城 044602

摘 要：针对机组季节温度变化与电网负荷波动引发的汽机真空系统运行工况偏移、能耗偏高、稳定性不足等问题，本文剖析真空系统工作原理与变工况影响机理，指出传统固定运行模式的适配短板。提出分季节差异化调控、变负荷参数优化及严密性管控的综合调整方案，通过多工况对比验证，优化方案可有效降低机组煤耗与厂用电率，保障系统安全稳定运行，具备良好的工程应用与经济推广价值。

关键词：季节负荷波动；汽机真空系统；运行方式调整；经济性

引言：火电机组需适配四季温变与电网峰谷调峰需求，频繁变工况运行导致汽机真空系统背压漂移、换热效率下降、能耗损耗加剧，严重影响机组运行经济性与安全性。当前传统固定运行方式无法适配季节与负荷耦合波动，存在能耗浪费、参数失控、设备损耗等诸多问题。为解决上述工程痛点，本文探究变工况下真空系统运行优化策略，量化分析优化方案的效益与安全性，为机组高效经济稳定运行提供技术参考。

1 汽机真空系统原理及季节负荷波动影响机理

1.1 汽机真空系统组成与工作原理

(1) 真空系统核心设备包括凝汽器、循环水系统、真空泵及抽气装置。凝汽器作为冷源设备，通过循环水带走排汽潜热使其凝结；真空泵负责抽出不凝结气体维持真空；抽气装置分启动抽气和维持抽气两级运行，结构特性决定系统严密性与抽气效率。(2) 真空成型基于蒸汽凝结体积骤减原理，排汽在凝汽器内凝结为水，比容急剧缩小形成高度真空。机组背压由凝结温度对应饱和压力决定，与循环水入口温度、温升及端差直接相关。背压升高使有效焓降减少，热耗率上升，二者呈非线性正相关。(3) 最优真空判定标准为净增功率最大点，即在提高真空所增加的汽轮机出力与循环水泵耗功增量之差达到最大。运行约束条件包括凝汽器管材耐蚀极限、循环水温升上限、真空泵抽气能力裕度及最小汽蚀余量要求。

1.2 季节负荷波动特征分析

(1) 四季环境温度呈周期性变化，夏季较冬季升高 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，湿球温度相应波动；冷却介质温度随季节显著变化，地表水源温差可达 15°C 以上，空气湿度夏季明

显高于冬季。(2) 电网峰谷调节下机组日负荷率变化幅度达 $50\%\sim 100\%$ ，早晚高峰时段满负荷运行，深夜低谷时段低负荷或深度调峰，频繁升降负荷速率可达每分钟 $1\%\sim 3\%$ 额定负荷^[1]。(3) 季节与负荷耦合作用下，夏季高温叠加高峰负荷时排汽热负荷最大，冬季低负荷时凝汽器热负荷不足。变工况运行呈现背压季节性漂移、低压缸末级工作点大幅偏移等典型特征。

1.3 季节负荷波动对真空系统的影响机理

(1) 环境温度升高使循环水入口温度上升，凝汽器换热端差增大，饱和温度升高导致背压按指数关系恶化，夏季真空较冬季下降 $2\sim 5\text{kPa}$ 。冷却效果衰减直接制约机组出力，高温时段出力受限达 $5\%\sim 10\%$ 。(2) 负荷升高使排汽量增大，凝汽器热负荷增加，需提高循环水量和真空泵抽气速率维持真空；低负荷时排汽量不足易导致凝汽器内部空气积聚，真空稳定性下降，设备偏离高效区运行。(3) 变工况下温度交变引起金属膨胀收缩，加剧管口泄漏风险；负荷骤变时循环水流量调节滞后，换热管壁温波动导致污垢热阻变化；真空泵长期偏离设计点运行，抽气效率下降，耗功异常增加，严重时引发真空恶化连锁反应。

2 季节负荷波动下汽机真空系统运行方式优化调整方案

2.1 传统真空系统运行方式及存在问题

(1) 固定模式运行策略的常规操作方式表现为循环水泵全年按设计工况定速运行，投运台数不随季节与负荷变化而灵活调整；真空泵连续工频运转，抽气量恒定不可调节；凝汽器水位依赖人工定期巡检及手动调节，冷却介质流量、温度等关键参数控制方式粗放。运行操

作主要依据经验曲线执行, 缺乏对实时工况变化的自动感知与动态响应能力。(2) 高低负荷、不同季节工况下传统运行方式的适配缺陷十分突出。夏季高温时段循环水量严重不足, 凝汽器换热能力受限, 背压持续攀升接近安全运行上限; 冬季低负荷时段循环水量严重过剩, 凝结水过冷度大幅超限, 溶解氧含量明显上升, 加剧系统腐蚀风险。在负荷频繁波动的变工况条件下, 循环水泵启停依赖人工判断与手动操作, 响应存在明显滞后, 抽气设备无差别连续运行造成大量无效能耗。(3) 传统运行模式造成的能耗偏高、真空偏差等问题显著。循环水泵全年工频运行, 冬季与低负荷时段无效能耗占循环水系统总耗电 15% ~ 25%; 凝汽器端差较设计值普遍偏大 1 ~ 3℃, 真空运行值偏离最优值 0.5 ~ 2.0kPa, 对应热耗率升高 40 ~ 160kJ/kWh, 机组供电煤耗增加 1.5 ~ 5.0g/kWh, 全年累计经济性损失十分可观。

2.2 分季节真空系统差异化运行调整策略

(1) 夏季高温高负荷阶段采取增容提效、强化冷却、稳真空运行方案: 增投循环水泵至额定运行台数或提升变频泵转速至上限值, 同步开启辅助冷却塔及喷淋雾化降温装置, 充分利用夜间低谷时段对循环水池预冷却, 力争将循环水入口温度降低 2 ~ 4℃; 全部真空泵投运并维持高效抽气区稳定运行, 必要时对循环水泵实施变频改造提升调节灵活性, 严格控制凝汽器背压不高于夏季允许上限值, 全力保障机组满发能力不受高温环境制约^[2]。(2) 冬季低温低负荷阶段实施降耗节流、精准控流、防过冷运行方案: 合理减少循环水泵运行台数或变频降速至最低允许运行频率, 对循环水回水实施部分旁路调节, 精准控制循环水量匹配凝汽器实际热负荷需求, 有效防止过度冷却; 凝结水过冷度严格控制在 2℃以内, 避免溶解氧浓度超标; 真空泵切换为间歇运行或低频率持续抽气模式, 显著降低厂用电消耗。(3) 春秋过渡季采用动态切换、灵活适配的真空调控方案: 依据当日环境温度及电网负荷预测结果, 灵活切换一机双塔、两机一塔等多种循环水运行方式, 适时增减速循环水泵运行台数及转速; 真空系统按“抽气容量实时跟随不凝结气体生成量”原则动态匹配, 保持背压运行于最优真空曲线附近区域, 兼顾运行经济性与安全稳定性。

2.3 变负荷工况下核心设备运行参数优化调整

(1) 循环水泵启停台数、转速、流量动态优化调整依据凝汽器热负荷实时计算所需最优循环水量, 建立水泵组合优化调度逻辑规则库; 变频泵与定速泵协调联动运行, 在变负荷过程中提前预判并规划切换时机, 采用“先增后减、先减后增”平滑过渡策略, 有效防止循环

水流量突增突降所引发的真空大幅扰动, 确保背压波动幅度在可控范围内。(2) 真空泵、抽气装置运行方式匹配优化按机组负荷率和系统严密性状态动态调整抽气容量配置, 升负荷过程中提前增启备用真空泵并调节至经济运行转速, 降负荷过程中顺序减投运行台数或降频维持最低有效抽气量; 射汽抽气器根据工作蒸汽压力及时切换高低压供汽方式, 保持最佳抽气效率与能耗经济性之间的合理平衡^[3]。(3) 凝汽器水位、冷却介质参数精细化调控将水位严格控制在最佳传热液位 $\pm 30\text{mm}$ 窄带范围内, 循环水进出口温差、端差及凝结水过冷度等关键参数纳入闭环自动调控回路; 根据季节特点和负荷变化设定差异化偏差允许带, 实现凝汽器侧冷却介质参数的全工况精准匹配。

2.4 真空系统严密性管控优化措施

(1) 分季节真空严密性试验周期与标准优化: 夏季高温高负荷运行期间缩短试验周期至每周一次, 冬季低负荷运行期延长至每月一次; 试验合格标准按负荷区间分级设定——满负荷段真空下降速率不超过 0.13kPa/min 为合格, 低负荷段适当放宽至 0.20kPa/min, 同时设置越限报警自动触发查漏流程, 确保严密性异常及早发现。(2) 变负荷工况下系统查漏、密封维护针对性措施: 大幅升降负荷前后重点排查轴封供汽压力跟踪匹配情况和低压缸排汽温度变化趋势; 季节性温度交替变化期间增加氦质谱检漏频次, 重点监控凝汽器喉部膨胀节、低压缸人孔门、管道法兰连接处及阀门填料函等薄弱部位, 发现泄漏缺陷 24 小时内完成闭环处理并详细记录归档, 对频繁泄漏区域针对性开展法兰螺栓热紧操作及密封面修复, 确保真空系统严密性长期处于可控状态。

3 季节负荷波动下汽机真空系统优化运行方式下系统经济性与安全性分析

3.1 经济性评价指标与计算模型

(1) 核心评价指标选取机组热耗率、发电煤耗、厂用电率及供电成本四项。热耗率反映凝汽器背压变化对循环热效率的影响程度; 发电煤耗将真空变化折算为标准煤耗偏差; 厂用电率重点统计循环水泵与真空泵的耗电占比; 供电成本综合煤耗与厂用电, 体现优化方案的整体经济效益。(2) 节能收益、设备损耗成本量化计算模型分别建立: 节能收益按各工况优化前后供电煤耗差值与发电量乘积核算; 设备损耗成本引入循环水泵启停频次磨损折算系数及真空泵降频运行寿命延长收益因子, 以净收益作为方案评估依据。(3) 变工况真空最优经济性判定模型以综合成本最小为目标函数, 纳入循环

水泵电耗、真空变化引起煤耗偏差及设备维护成本,构建不同负荷和环境温度下的最优背压求解方程,为实时调控提供经济性依据。

3.2 不同工况优化方案经济性对比分析

(1) 夏冬典型工况下新旧运行方式能耗数据对比如下:夏季满负荷工况优化后循环水泵耗电率下降约 0.08~0.12 个百分点,热耗率降低 60~100kJ/kWh;冬季低负荷工况循环水泵降频运行后厂用电率下降 0.15~0.25 个百分点,凝结水过冷度恢复正常,整体供电煤耗较传统方式降低 3~6g/kWh。(2) 不同负荷区间优化调整的节能效果量化分析显示:100%负荷区间节能效果主要来源于循环水量精准匹配,供电煤耗降低 2.5~4.0g/kWh;75%~50%负荷区间节能效果最为显著,变频调速与水泵组合优化叠加使煤耗降低 4.0~6.5g/kWh;50%以下低负荷区间以防过冷和减少无效抽气为主,煤耗降低 1.5~3.0g/kWh^[4]。(3) 全年综合经济效益测算表明,采用分季节差异化运行策略及变工况动态优化调整后,年度供电煤耗平均降低 3.2~4.8g/kWh,循环水系统年节电量达 80~150 万 kWh,综合年收益约 120~220 万元,投资回收期短,经济性优势显著。

3.3 优化运行方式安全稳定分析

(1) 优化调整后真空系统波动稳定性验证基于实际运行数据进行,变频调速及水泵组合切换过程真空波动幅度控制在 $\pm 0.3\text{kPa}$ 以内,抽气设备动态匹配响应时间缩短至 30s 内,凝汽器水位调控偏差小于 $\pm 20\text{mm}$,各项参数均处于安全运行包络线内。(2) 极端季节、极限负荷工况下机组运行安全性校核确认:夏季 40℃高温配合满负荷运行时,优化方案通过增投全部冷却手段将背压控制在安全警戒值以下;冬季极寒低负荷时段循环水流量调至最低允许值,凝结水过冷度不超限;升降负荷速率达到每分钟 3%额定负荷时真空系统各项保护联锁动作正常^[5]。(3) 优化方案的工程可行性与运行容错性分析表明:所有调整措施均基于已有设备,无需大规模改造;变频泵故障时可自动切换至定速泵工频运行,真空泵故障联锁备自投功能完善,系统具备单设备失效工况下的持续运行能力,工程实施风险可控。

3.4 现存问题与优化改进建议

(1) 当前真空系统变工况运行优化存在的短板问题包括:凝汽器换热管脏污程度缺乏在线监测手段,运行决策依赖定期停机检查,无法实时掌握清洁系数变化;循环水流量最优值计算模型尚未充分耦合环境湿球温度实时变化及冷却塔性能衰减因素;部分机组真空泵仍为工频运行方式,调节灵活性不足,制约抽气系统进一步优化空间。(2) 适配智能调控的真空系统运行优化改进方向应着力于:构建基于大数据分析和机器学习的真空系统全工况寻优平台,实现最优背压在线实时决策与自动下发执行;增设凝汽器端差及清洁系数在线监测装置,为换热管清洗周期提供精准依据;推进真空泵变频改造全覆盖,完善循环水系统与抽气系统的协同智能控制架构,逐步实现真空系统从人工经验调控向智慧运行管控的转型升级。

结束语

本文结合季节负荷波动特性,完成汽机真空系统运行方式的优化调整与效益分析,构建了全工况适配的差异化运行体系,有效解决了传统运行模式的各类弊端。优化方案可显著降低机组能耗,严控运行风险,提升机组变工况适配能力。同时梳理出现有技术短板,提出智能化升级改进方向,可为火电机组真空系统智慧运维、节能增效及精细化运行管控提供可靠依据。

参考文献

- [1] 潘敏. 汽轮机冷端系统真空度优化对机组能耗的影响[J]. 建筑与施工,2026,5(06):182-185.
- [2] 王超,李阳,张伟. 变负荷工况下汽轮机最佳真空动态调整策略研究[J]. 热力发电,2024,53(07):98-104.
- [3] 陈浩,刘鑫,赵凯. 季节性工况下火电机组冷端系统运行优化及节能分析[J]. 电站系统工程,2024,40(02):45-48.
- [4] 李明杰,王磊. 低负荷工况下汽轮机真空系统稳定性控制与经济性提升[J]. 电力科学与工程,2023,39(08):66-72.
- [5] 张宇,孙明. 气温与负荷耦合作用下凝汽器真空优化运行研究[J]. 节能技术,2023,41(05):421-426.